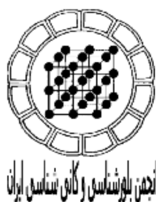
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۴۰۵ تا ۴۱۶



[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.14.7]

[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.405]

ریخت‌شناسی برخالی و چندبرخالی لایه‌های کربن شبه‌الماسی با آلایش نقره-نیتروژن

امیر زلتی[*1]، علی آرمان[2]، عزیزاله شفیع‌خانی[3]، سحر رضایی[4]

۱-گروه علوم پایه، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

۲-گروه پژوهشی فناوری خلأ، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳-گروه نانوفیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۴-گروه فیزیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۳۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸)

چکیده: امروزه لایه کربن شبه‌الماسی برای کاربردهای صنعتی و زیستی مورد توجه است، به طوریکه با وارد کردن ناخالصی (فلزی یا غیر فلزی) به آن، به دنبال ایجاد ویژگی های ساختار و مکانیکی جدیدی هستند. از اینرو در این پژوهش نانوذرات نقره در بستری از لایه نازک کربن شبه‌الماسی روی زیرلایه‌های مختلف فلزی با استفاده از روش همزمان کندوپاش پلاسمای بسامد رادیویی و انباشت بخار شیمیایی تهیه و مشخصه‌یابی شدند. لایه‌ها از هدف نقره در محیطی از ترکیب گازهای استیلن و نیتروژن و در فشارهای مختلف کاری ساخته شدند. ریختار (مورفولوژی) لایه‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بر اساس استاندارد 25178-2: 2012 بررسی گردید و نتایج آماری به دست آمده از داده‌های AFM نشان داد که مکان نگاری سطح لایه‌ها در فشارهای مختلف با توجه به طبعیت زیرلایه، دستخوش تغییر شده است، بطوریکه نمونه‌های تهیه شده در فشار کاری ۱۸/۵ میلی تور بالاترین زبری سطح را نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند. پس از آن ویژگی برخالی (فرکتالی) لایه‌های تهیه شده بصورت نظری بررسی گردید و مشخص شد که همه آنها ویژگی‌های چندبرخالی (چندفرکتالی) دارند. نتایج بررسی چند برخالی لایه‌ها همخوانی خوبی با سایر داده‌های آماری AFM داشت. همچنین با کمک طیف‌سنجی‌های پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDS) و رامان، تشکیل ساختار و وجود عناصر کربن، نیتروژن و نقره و وجود ساختار کربن شبه‌الماسی تایید شد.

واژه‌های کلیدی: *ریخت شناسی؛ برخال (فرکتال)؛ کربن شبه الماسی؛ میکروسکوپ نیروی اتمی.*

مقدمه

امروزه موضوع صرفه جویی و استفاده بهینه از منابع و انرژی به یکی از مباحث مورد توجه بسیاری از کشورها تبدیل شده است، از این رو به کارگیری فناوری‌های نوین در صرفه جویی اقتصادی را راهگشای بسیاری از نیازهای جوامع بشری امروزی تعریف کرده‌اند. در سال‌های اخیر، رشد چشم‌گیر ارتباطات، پردازش و ذخیره‌سازی اطلاعات، تولید صفحه‌های نمایش، صنایع تزئینی، ابزار نوری، مواد سخت و عایق‌ها و میکروالکترونیک نتیجه‌ی تولید لایه‌های نازک براساس فناوری‌های نوین است. از این‌رو، این علم پژوهش‌های بسیاری را به خود اختصاص داده است. دو ویژگی که لایه‌های نازک و بسیار نازک یکی ضخامت زیرمیکرونی آنهاست که هر چه به مقیاس نانو نزدیک‌تر شود، ویژگی‌های متفاوت‌تری را برای لایه بوجود می‌آورد و دیگری نسبت سطح به ضخامت لایه است؛ این دو ویژگی منجر به ویژگی های متفاوت و کاربردی می‌شوند [۱، ۲] که می‌توان از آن‌ها برای بهبود فناوری‌هایی چون سلول‌های خورشیدی، حسگرها، ابزار نوری، الکترونیک، فروالکترونیک و پزشکی نیز استفاده نمود [۴،۳]. همه ویژگی‌های لایه‌های نازک (الکتریکی، نوری، مغناطیسی، گرمایی و مکانیکی) وابسته به روش تولید، شرایط هندسی انباشت، نوع ماده انباشتی،

نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۳۰۴۷۵۵۰، پست الکترونیکی: azelati@birjandut.ac.ir

جنس و شرایط فیزیکی زیرلایه (از جمله ساختار بلوری، راستای بلوری و زمختی آن) هستند. از این رو، پژوهشگران برای توصیف آن، مدل‌های متعددی ارائه نموده‌اند. این مدل‌ها رابطه بین پارامترهای انباشت و ریزساختار لایه را بیان می‌کنند [۵-۸]. همه مدل‌های ریخت‌شناسی بر پایه مشاهده‌ها و اندازه‌گیری‌های مستقیم (برای مثال با میکروسکوپ‌های الکترونی و نوری، میکروسکوپ میدانی یونی) و غیرمستقیم (تحلیل عکس‌ها، پراکندگی الکترونی، پراش پرتو X و شبیه‌سازی کامپیوتری) استوار هستند [۹-۱۳]. بنابراین، برای تعیین رابطه بین شرایط تهیه لایه و ویژگی های آن، می‌توان از ارتباط دادن شرایط به ریخت لایه و از آن به ویژگی های لایه شروع کرد.

از اینرو در چند دهه گذشته، پژوهش های قابل توجهی در زمینه‌ی گسترش ابزارهای تجربی و محاسباتی برای توصیف مکان نگاری سطح لایه‌های نازک در مقیاس نانو صورت گرفته است [۲-۱۴]. در این میان، استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به عنوان یک روش غیرمخرب با توان ارائه‌ی تصاویری با وضوح فضایی بالا، به همراه بررسی‌های آماری و برخالی (فراکتالی)، پژوهشگران را قادر به استخراج اطلاعات کمی از ویژگی‌های سطح کرده است [۲، ۵، ۷-۱۷]. البته، بدلیل پیچیدگی ریخت‌شناسی سطح، ساختارهای نانو و میکرو غیرعادی را نمی‌توان تنها با بررسی‌های بر پایه هندسه‌ی اقلیدوسی سنتی به طور دقیق توصیف کرد. از این رو، ساختارهای پیچیده با هندسه‌ی برخالی و چندبرخالی توصیف می‌شوند که در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی سطح نتایج موفقیت‌آمیزی داشته‌اند. این نگرش در مقایسه با بررسی‌هایی ایستایی، توان بیشتری برای استخراج داده‌های متنوع از ویژگی‌های سطح بر اساس ریخت‌شناسی آن‌ها، با زمان محاسباتی کم و دقت بالا دارد [۱۹،۱۸].

در این میان، کربن و لایه‌های نازک کربن شبه الماسی بعنوان یکی از عناصر مهم در طبیعت، به دلیل دارا بودن ویژگی های مختلف توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۲، ۲۰-۲۴]. لایه‌های کربن شبه الماسی (DLC) دارای ویژگی‌های بی‌مانندی چون سختی مکانیکی بالا، ویژگی‌های نوری و الکتریکی متفاوت، مقاومت الکتریکی بالا، پایداری شیمیایی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، زیست سازگاری و تولید در دمای پایین حتی کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی گراد هستند. آنها بصورت نیم رسانای بی شکل (آمورفی) هستند که هیچ ساختار شبکه ای غالبی ندارند و شامل مخلوطی از فازهای SP^2 (گرافیت) و SP^3 (الماس) هستند. و برپایه حضور هیدروژن در آنها، به دو دسته کلی کربن‌های بی‌شکل غیر هیدروژنی (a-C) و کربن‌های بی‌شکل هیدروژنی (a-C:H) تقسیم می‌شوند [۲، ۲۵-۲۷]. ویژگی های این لایه‌ها وابسته به شرایط لایه نشانی، مقدار فلز و هیدروژن موجود در لایه، درصد SP^2 و SP^3 ، ولتاژ تغذیه لایه، انرژی یونی، چگالی یون و نیز دمای لایه است [۲، ۲۲].

چنان که اشاره شد، ویژگی‌های بی‌مانند لایه‌های DLC، امروز پژوهشگران را ترغیب کرده است که بمنظور تغییر یا اصلاح ویژگی های ساختاری و سطحی آنها، مواد متنوعی از جمله نیتروژن، سیلیکون، فلوئور و فلزها را به این لایه‌های کربنی بیافزایند [۲، ۲۸]. در این میان، افزودن نانوذرات فلزهای نجیب (مس، طلا و نقره) در زمینه‌ای از کربن بی‌ریخت (هیدروژنی یا غیر هیدروژنی) می‌تواند منجر به تولید مواد جدیدی با کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف صنعتی و پزشکی کاتالیزورها، وسایل پلاسمونی، پیل سوختی و ایمپلنت‌های پیوندی شود [۲، ۲۹-۳۱].

در این پژوهش، اثر افزایش ناخالصی یون‌های نیتروژن در ساختار لایه‌های تشکیل شده از ذرات نقره در زمینه کربنی بر زیرلایه‌های مختلف فلزی از جنس مس، آلومینیم و استیل براساس ریخت شناسی لایه‌ها بررسی می‌شود.

به این منظور، برای تشکیل لایه‌ها از مخلوطی از گازهای استیلن بعنوان گاز هیدروکربنی و گاز نیتروژن بعنوان ناخالصی (C_2H_2+N_2) استفاده شد. در اینصورت نیتروژن، از یک سو در فرآیندهای همزمان کندوپاش بسامد رادیویی (RF) و انباشت بخارشیمیایی تقویت شده با پلاسمای بسامد رادیویی (RF-PECVD) باعث حذف تعداد زیادی از دسته‌های آزاد کربنی شده و از نفوذ اکسیژن و اکسید شدن نانوذرات جلوگیری می‌کند و از سوی دیگر، با حذف دسته‌های آزاد کربنی و اشباع شدن آنها بر ریختار سطح و پایداری مکانیکی لایه ها اثر می گذارد. سپس ریخت شناسی لایه‌ها با روش‌های بر پایه هندسه برخال که امروزه در مهندسی از داده‌های AFM استخراج می‌شود و بر اساس استاندارد ISO 25178-2: 2012 است انجام شد. افزون برآن، از طیف‌سنجی‌های پراکندگی انرژی پرتو

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.14.7]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.405]

ایکس (EDX) و رامان برای راستی سنجی تشکیل لایه‌ها استفاده شد.

روش آزمایش

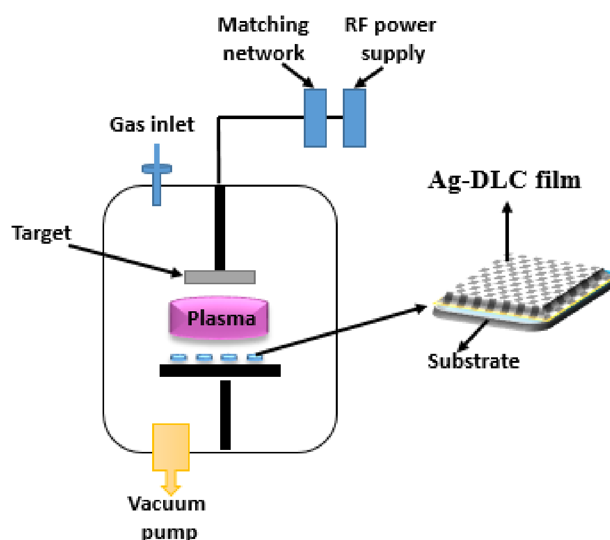
نانوذرات نقره به روش همزمان کندوپاش با امواج‌رادیویی و انباشت بخار شیمیایی با پلاسمای بسامد رادیویی در بستری از کربن شبه‌الماسی ساخته شدند. به این منظور از مخلوطی از گاز استیلن بعنوان گاز هیدروکربنی و گاز نیتروژن بعنوان ناخالصی استفاده شد. هدف استفاده از این دو گاز بررسی اثر یون‌های نیتروژن در ساختار لایه و ریخت‌شناسی ذرات نقره است. رادیکال‌های هیدروکربنی در کنار یون‌های نیتروژن از یک سو نقش اصلی بمباران هدف برای پراکنش اتمهای نقره را دارند و از سوی دیگر همراه با یون‌های نیتروژن در کنار اتمهای نقره بر زیرلایه انباشته می‌شوند. محفظه خلأ شامل دو الکترود با مساحت‌های متفاوت، یک پمپ چرخشی و خلأسنج، دو ورودی گاز و منبع امواج‌رادیویی است. فشار محفظه با پمپ می‌تواند تا ۶×۱۰^{-۳} تورکاهش یابد. الکترود کوچکتر یا کاتد (الکترود هدف نقره با خلوص ۹۹.۹۹٪) با شعاع ۵ سانتی‌متر به منبع RF با بسامد ۱۳.۵۶ مگاهرتز متصل شد. الکترود بزرگتر یا آند با شعاع ۱۳ سانتی‌متر از طریق بدنه محفظه به زمین متصل شد و نگهدارنده‌ی زیرلایه‌ها نیز بود.

لایه‌نشانی در فشارهای کاری مختلف بر زیرلایه‌هایی با اندازه تقریبی ۱×۱ سانتیمتر مربع از جنس مس، آلومینیم و استیل در دمای اتاق انجام شد. طرحواره‌ای از محفظه لایه‌نشانی در شکل ۱ نشان داده شده است.

فشار اولیه محفظه ۶×۱۰^{-۳} تور و مقدار شار گازهای ورودی از طریق کنترل‌کننده‌ی جرمی‌شار تنظیم گردید و آنگاه لایه‌های ساخته شده بر زیرلایه‌های مس، آلومینیم و استیل با شرایط جدول ۱ تهیه شدند.

نمونه‌های تهیه شده در فشارهای کاری مختلف به صورت زیر برچسب زده شدند: سری اول: Cu-1,Al-1,SS-1، سری دوم: Cu-2,Al-2,SS-2 و سری سوم: Cu-3,Al-3,SS-3.

ساختار سطحی نمونه ها با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، ساخت شرکت Vecco آمریکا انجام شد.



شکل ۱ طرحواره‌ای از محفظه‌ی خلأ و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن [۲].

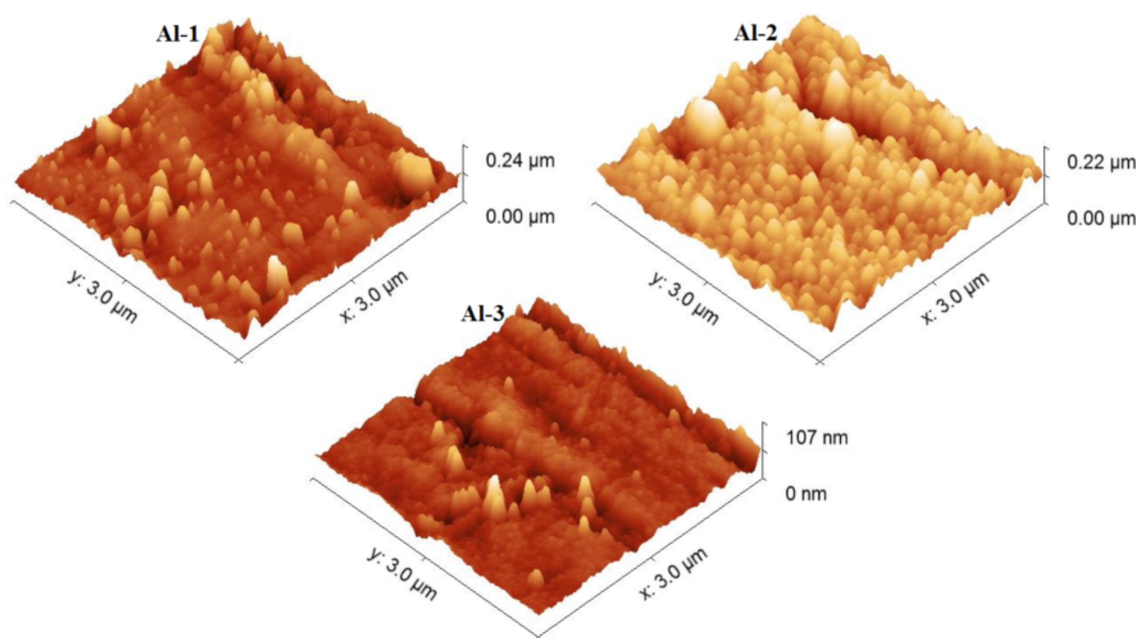
جدول ۱ شرایط ساخت لایه‌ها.

نمونه	فشار کاری $C_2H_2+N_2$ (میلی‌تور)	توان منبع (وات)	زمان انباشت (دقیقه)
سری اول	۱۷٫۵	۱۰۰	۳۰
سری دوم	۱۸٫۵	۱۰۰	۳۰
سری سوم	۱۹٫۵	۱۰۰	۳۰

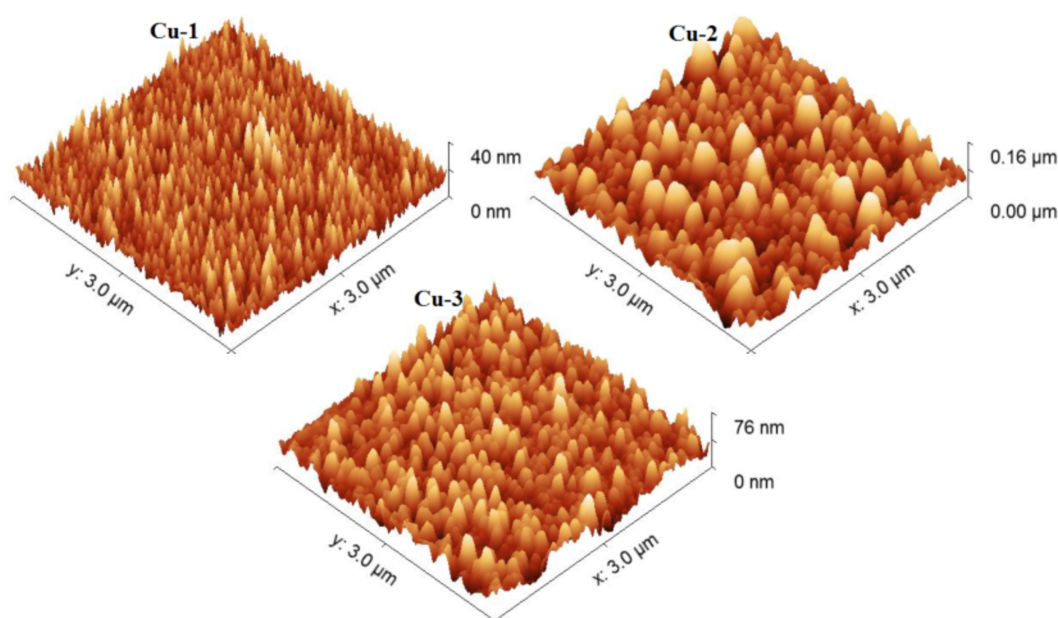
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.14.7]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.405]

نتایج و بحث

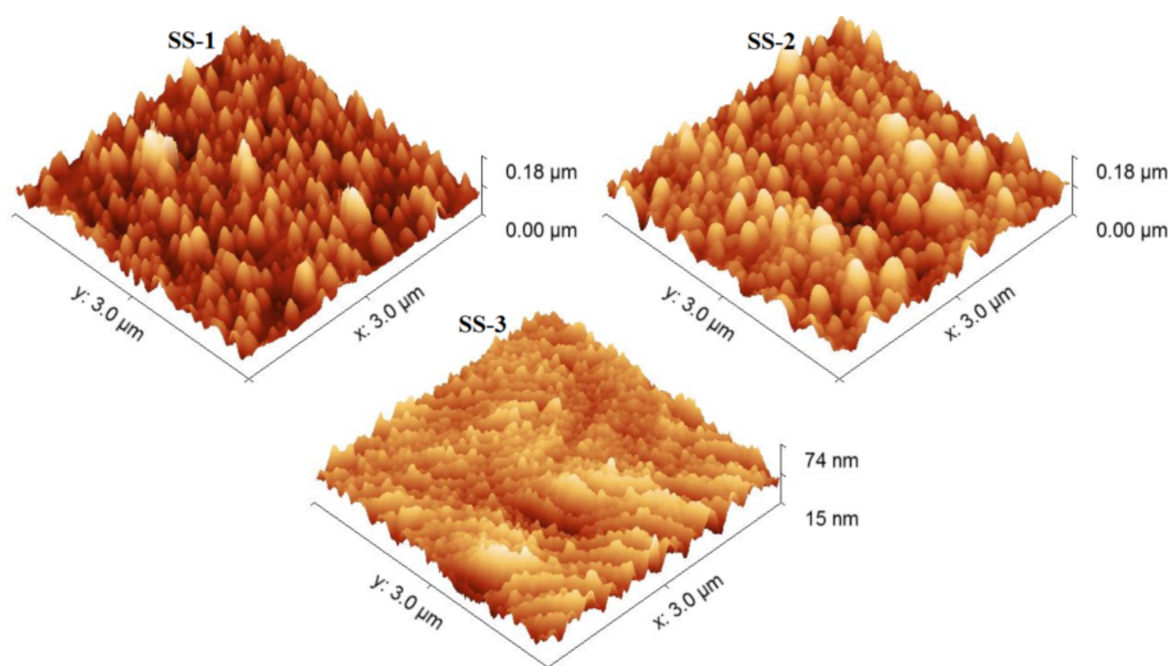
شکل‌های۲، ۳ و ۴ تصاویر AFM سه بعدی با اندازه ۳µm ×۳µm از نانوذرات نقره در بستری از کربن شبه‌الماسی بر زیرلایه‌های آلومینیوم، مس و استیل را نشان می‌دهند. ریخت‌شناسی لایه‌ها نشان می دهد که سطح زیرلایه‌ها با پوششی از قله‌ها و دره‌ها از نانوذرات نقره و بستر کربنی در هم تنیده شده است. چنان که از شکل‌ها پیداست، نمونه‌های Al3,Cu1,SS3 نسبت به دیگر نمونه‌های هم گروه خود، دارای تابع توزیع قله و دره‌ی بهنجارتری هستند از اینرو انتظار می‌رود که در مقایسه با بقیه سطحی صاف‌تر داشته باشند.



شکل ۲ تصویر AFM سه بعدی از نمونه‌های با زیرلایه آلومینیوم.



شکل ۳ تصویر AFM سه‌بعدی از نمونه‌های با زیرلایه مس.



شکل ۴ تصویر AFM سه‌بعدی از نمونه‌های با زیرلایه استیل.

در داده‌های آماری، S_a ناهمواری میانگین یا میانگین ارتفاع نسبت به سطح مرجع بوده، در حالیکه S_q ریشه میانگین مربعی انحراف نسبت به سطح مرجع است. از نظر ایستایی، پارامتر S_q (انحراف معیار) اهمیت بیشتری دارد، چرا که تغییرات زبری سطح را بیان می‌کند و اغلب پایه فیزیکی بیشتری نسبت به S_a دارد. سایر مشخصه‌ها و پارامترهای ایستایی از سطح نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. دیده می‌شود که پارامترهای S_a و S_q تغییرات مشابهی برای نمونه‌ها دارند، به طوری که به هم وابسته هستند. این نتایج با تصاویر میکروسکوپی همخوانی دارند. نتیجه دیگر برآمده از ریخت‌شناسی و پارامترهای آماری لایه‌های تهیه شده در این پژوهش این است که فشار کاری حدود ۱۸٫۵ میلی‌تور از گازهای ترکیبی ورودی به تولید لایه با ریخت خشن‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها منجر می‌شود که این امر گویای رشد جزیره‌ای یا ولمر-وبر است.

چنان که پیشتر نیز بیان شد، بدلیل پیچیدگی‌های ریخت‌شناسی سطح در ساختارهای نانو و میکرو، می‌توان از هندسه‌ی برخالی و چندبرخالی برای توصیف بهتر آنها استفاده کرد. البته باید در نظر داشت که برای ساختارهای سه بعدی، بعد برخالی D مقداری چون a دارد که در گستره بین ۲ (سطح صاف) و ۳ (سطح پرکننده فضا) است و نمی‌تواند برخی از ویژگی‌های ریزبافت سطحی پیشرفته چون ناهمسانگردی فضایی را مشخص کند. از اینرو برای ساختارهای سه بعدی چندبرخالی به جای یک بعد برخالی، طیف پیوسته از ابعاد برخال نیاز است. بنابراین محدودیت‌های بررسی برخالی با تحلیل چندبرخالی که برای درک توزیع جرم بر سطوح نمونه تعمیم یافته است، رفع می‌شود. برای این منظور در فضای سه-بعدی، یک سطح وقتی در بردارنده یاخته‌های مربعی N(ε) باشد، می‌توان آن را به عنوان یک سامانه چندبرخالی مشخص کرد که مجموع آماری آن، بر اساس رابطه زیر است:

$$Z(q,\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)} \quad (۱)$$

که در آن

$$p_i(\varepsilon) = r_i(\varepsilon) \Big/ \sum_{k=1}^{N(\varepsilon)} r_k(\varepsilon) \quad (۲)$$

$$(-\infty < q < +\infty)$$

$$r_i(\varepsilon) = \sum z_{kl}$$

با استفاده از رهیافت‌های تابع پارش، نمای مقیاسی چندبرخالی و بعد برخالی تعمیم یافته به صورت رابطه زیر است:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{(q-1)} \quad (۳)$$

جدول ۲ پارامترهای ایستایی نمونه‌های با زیرلایه آلومینیوم.

پارامتر	یکا	نمونه Al-1	نمونه Al-2	نمونه Al-3
S_q	[nm]	۲۱٫۹۸	۲۴٫۷۳	۸٫۱۳۵
S_a	[nm]	۱۵٫۴۵	۱۸٫۶۲	۵٫۷۵۷
S_{sk}	[-]	۱٫۰۷	-۰٫۰۹۳۰۱	۰٫۶۳۵۳
S_{ku}	[-]	۳٫۳۱۱	۱٫۵۳۵	۴٫۹۸۶

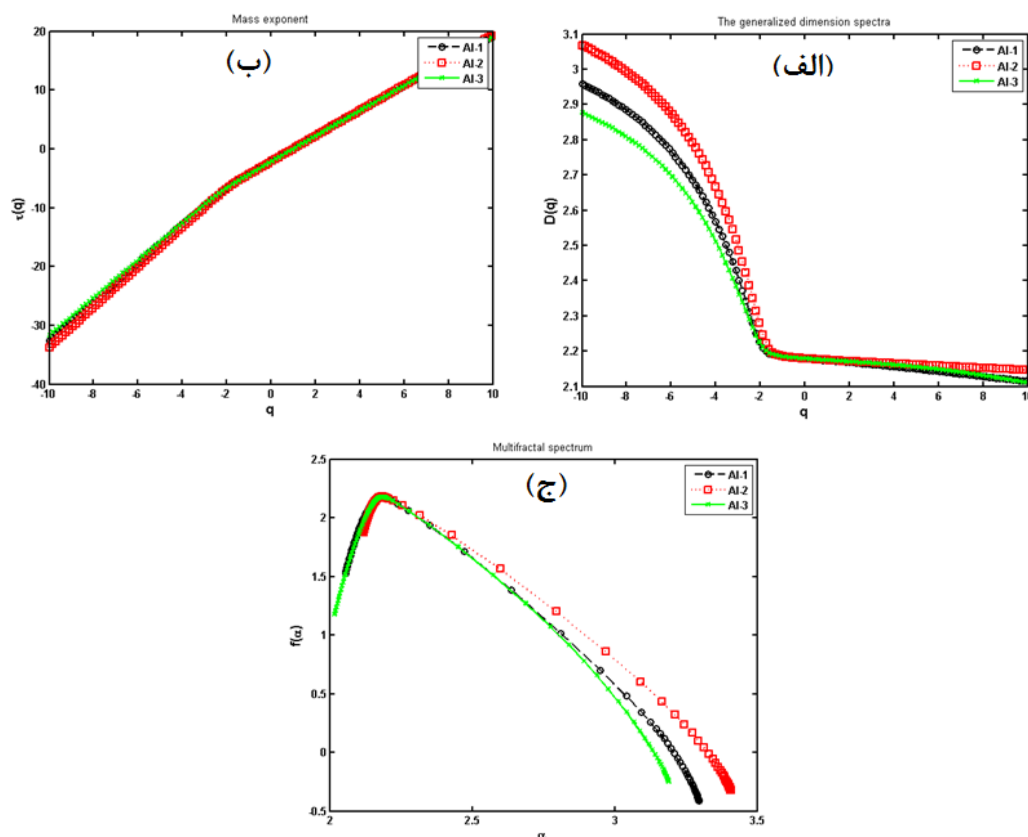
یا با استفاده از طیف تکینگی، f(a)، با تبدیل لژاندر بر حسب تابع نمای جرم $\tau(q)$ محاسبه شود که در آن، کمیت α شدت تکینگی یا نمای هولدر گفته می‌شود:

$$\tau(q) = q\alpha(q) - f(\alpha(q)) \quad (۴)$$

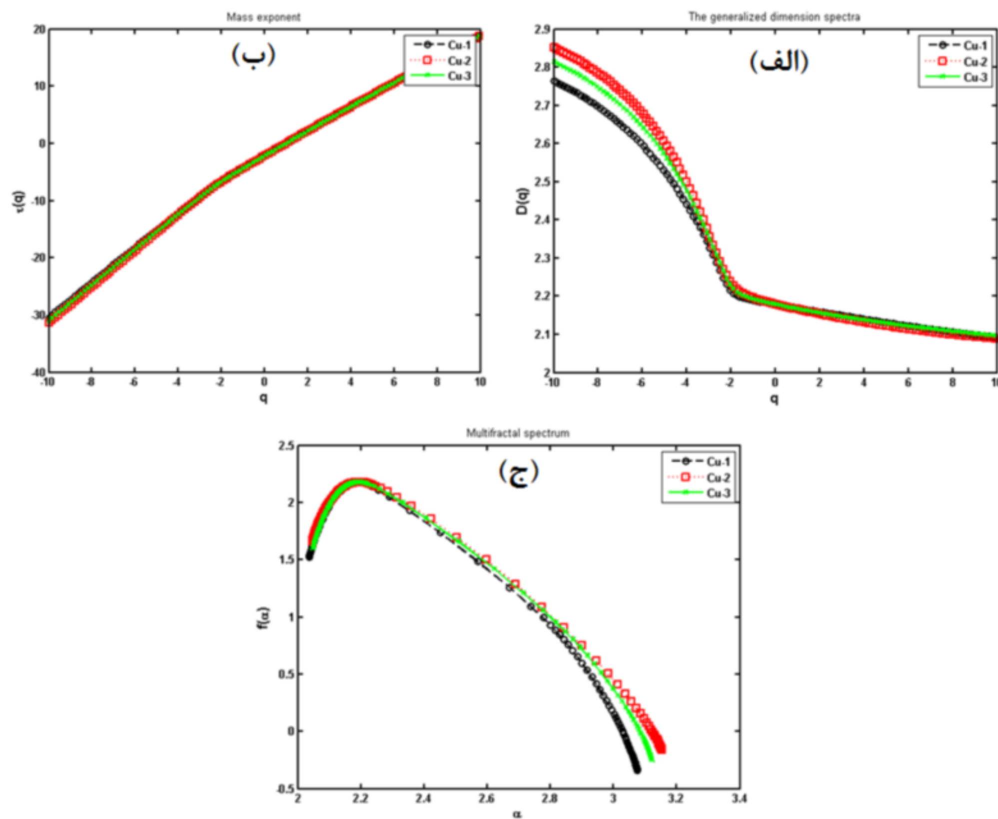
$$\alpha(q) = d\tau(q)/dq$$

در روابط بالا، $\Delta\alpha$ پهنای طیف چندبرخالی و Δf بیشینه و کمینه احتمال برخالی برای لایه هستند. از اینرو بر پایه پارامترهای کمی بیان شده که از نمودارهای برآمده از آنها بدست می‌آیند می‌توان به ریختار و ارتباط آن با سایر پارامترهای ایستایی را بررسی نمود [۲، ۷، ۲۰، ۳۲، ۳۳].

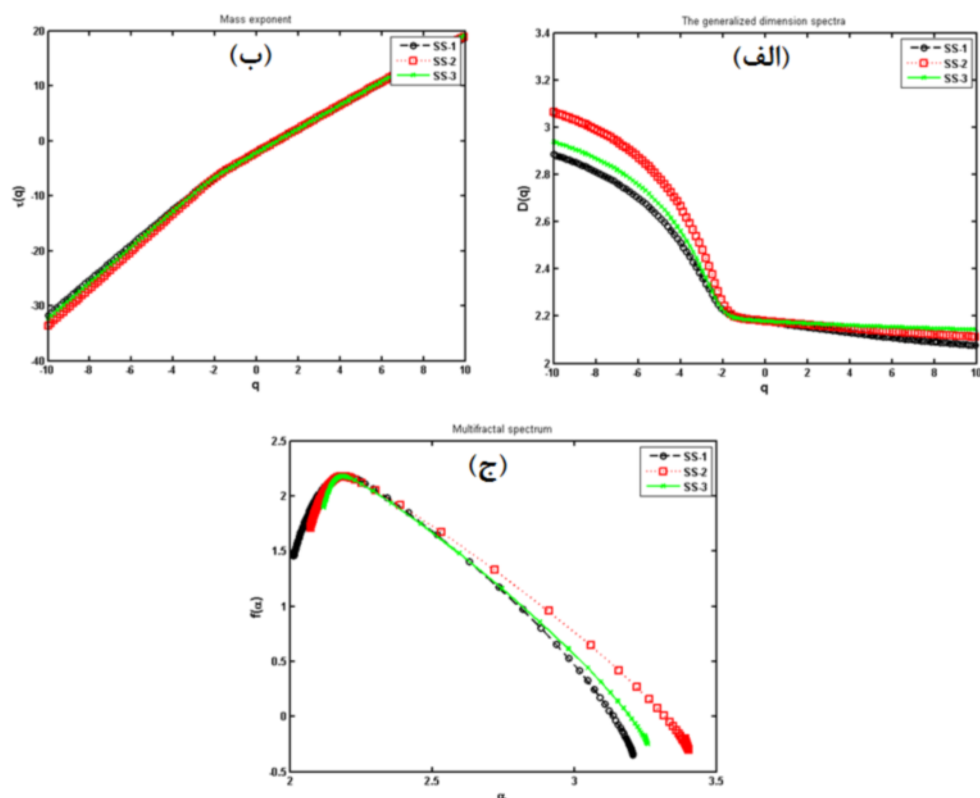
در ادامه برای لایه‌های تهیه شده از نقره بر سطوح مختلف فلزی، بر پایه روابطی که در بررسی نظری ریخت‌شناسی لایه‌ها بیان شد، یک تابع غیرخطی از مقادیر تعریفی رسم شد (تصاویر الف و ب در شکل‌های ۵ تا ۷). این شکل ها سطوح چند برخالی را برای لایه‌ها پیشنهاد می‌دهند. به بیان دیگر، در صورتی شاهد ماهیت تک‌برخالی در لایه‌ها هستیم که مقدار D(q) در همه سطوح مورد بررسی (تصاویر الف در شکل‌های ۵ تا ۷) بصورت تک مقدار تغییر کند و چون این تغییرات روند یکسانی ندارد چند برخالی در نمونه‌های تولیدی وجود دارد. تصاویر پ از شکل‌های ۵ تا ۷ طیف چندبرخالی لایه‌ها که بر پایه روابط تعریفی استخراج شده‌اند را نشان می‌دهد که مقادیر مربوط به هر یک از نمونه ها در جدول‌های ۳ تا ۵ آمده است.



شکل ۵ منحنی تغییرات D(q)، τ(q) و f(α) برای نمونه‌های Al.



شکل ۶ منحنی تغییرات D(q)، τ(q) و f(α) برای نمونه‌های Cu.



شکل ۷ منحنی تغییرات D(q)، τ(q) و f(α) برای نمونه‌های SS.

جدول ۳ پارامترهای چندبرخالی نمونه‌های Al .

پارامتر	نمونه Al-1	نمونه Al-2	نمونه Al-3
$f(\alpha_{max})$	-۰٫۴۱۰۳	-۰٫۳۲۳۱	-۰٫۲۴۹۷
$f(\alpha_{min})$	۱٫۵۱۶	۱٫۸۷۵	۱٫۱۸۱
Δf	۱٫۹۲۶۳	۲٫۱۹۸۱	۱٫۴۳۰۷
α_{max}	۳٫۲۹۵	۳٫۴۰۸	۳٫۱۹
α_{min}	۲٫۰۵۶	۲٫۱۱۹	۲٫۰۱۷
$\Delta\alpha$	۱٫۲۳۹	۱٫۲۸۹	۱٫۱۷۳

جدول ۴ پارامترهای چندبرخالی نمونه‌های Cu.

پارامتر	نمونه Cu-1	نمونه Cu-2	نمونه Cu-3
$f(\alpha_{max})$	-۰٫۳۳۷۷	-۰٫۱۶۵۳	-۰٫۲۵۱۷
$f(\alpha_{min})$	۱٫۵۲۷	۱٫۶۴۴	۱٫۱۶۱
Δf	۱٫۸۶۴۷	۱٫۸۰۹۳	۱٫۴۱۲۷
α_{max}	۳٫۰۷۵	۳٫۱۵۴	۳٫۱۲۲
α_{min}	۲٫۰۳۶	۲٫۰۴۶	۲٫۰۴۷
$\Delta\alpha$	۱٫۰۳۹	۱٫۱۰۸	۱٫۰۷۵

جدول ۵ پارامترهای چندبرخالی نمونه‌های SS.

پارامتر	نمونه SS-1	نمونه SS-2	نمونه SS-3
$f(\alpha_{max})$	-۰٫۳۴۵۵	-۰٫۳۰۱۲	-۰٫۲۵۴۷
$f(\alpha_{min})$	۱٫۴۵۶	۱٫۷۱۳	۱٫۹۰۹
Δf	۱٫۸۰۱۵	۲٫۰۱۴۲	۲٫۱۶۳۷
α_{max}	۳٫۲۰۷	۳٫۴۰۳	۳٫۲۵۹
α_{min}	۲٫۰۱۴	۲٫۰۷۳	۲٫۱۱۸
$\Delta\alpha$	۱٫۱۹۳	۱٫۳۳	۱٫۱۴۱

دیده می‌شود که شکل و عرض طیف‌ها (Δ)α(Δα) تا حدی شبیه هم و بصورت U برعکس هستند که بازوی چپ کوتاه‌تری دارند بطوری‌که بیشترین عرض به ترتیب برای زیرلایه‌های آلومینیم، مس و استیل در فشار کاری ۱۸.۵ میلی تور رخ می‌دهد که متناسب با داده‌های زبری در جدول‌های ۶ تا ۷ است. شاید بتوان چنین بیان کرد که افزایش زبری و $\Delta\alpha$ در این دسته از نمونه‌ها در نتیجه افزایش اندازه دانه‌بندی و کاهش تنش در نمونه‌ها رخ داده و رشد عمودی لایه‌ها در این فشار کاری نسبت به سایر نمونه ها بیشتر است [۳۴]. در قیاسی دیگر، با بررسی ریخت‌شناسی لایه‌های تهیه شده بر زیرلایه‌های مختلف در هر فشار کاری معین می‌توان چنین گفت که لایه نقره تهیه شده بر زیرلایه مس و لایه نقره بر زیرلایه آلومینیوم در فشار کاری ۱۸.۵ میلی تور، بترتیب صاف‌ترین و زبرترین سطح را داشته که با داده‌های چند بر خالی همخوانی بسیار خوبی دارند [۳۲، ۳۵].

طیف‌سنجی EDX برای نمونه SS2 با هدف بررسی عناصر موجود در لایه‌های تهیه شده بر زیرلایه‌های فلزی و در فشارهای کاری مختلف با اعمال ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۰kV با دستگاه مدل SAMx انجام شد. بر این اساس، وجود عناصر اصلی تشکیل دهنده (کربن، نقره و نیتروژن) در لایه‌ها و تا حدودی درصد حضور اکسیژن بمنظور احتمال اکسایش لایه‌ها بررسی شد که نتیجه در شکل ۸ آمده است. چنان که دیده می‌شود غیر از عناصر اصلی نامبرده در لایه‌ها (کربن، نقره و نیتروژن و تا حدی اکسیژن)، سایر عناصر تشخیصی مربوط به زیرلایه هستند.

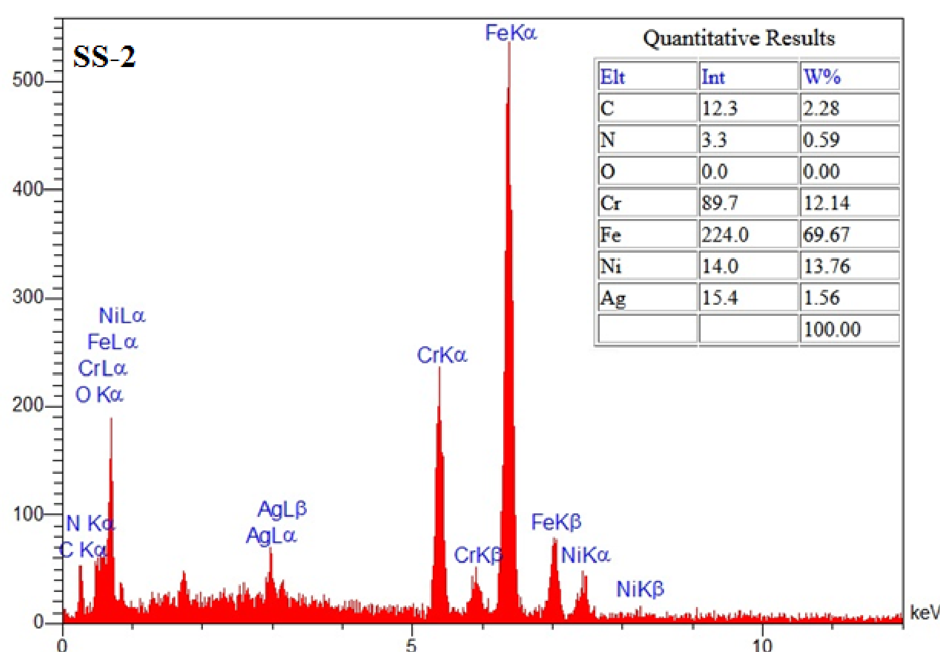
شکل ۹ طیف رامان لایه Ag-DLC تشکیل شده بر زیرلایه شیشه در فشار ۱۸/۵ میلی‌تور (شرایط نمونه های سری دوم) را نشان می دهد. لایه‌های نازک شبه الماسی با داشتن نوارهای D و G در طیف رامان، قله‌های گرافیت پهن‌تری نسبت به قله‌های تیز الماس دارند که مکان و شدت این قله‌ها در طیف رامان به نسبت پیوندهای SP^2 و SP^3 در لایه‌ها بستگی دارد [۲۲]. در این طیف، قله‌های پهن از نوارهای D و G در حدود ۱۳۵۰ و ۱۵۷۰ cm^{-1} حضور دارند. افزون بر این، قله‌هایی که تشکیل ساختار نقره را نشان می‌دهند نیز در حدود ۲۰۰ و ۷۰۰ cm^{-1} دیده می‌شوند [۲۷]. حضور قله‌هایی در نواحی بسامد بالا (در حدود ۳۰۰۰ cm^{-1}) نشان دهندهٔ تشکیل نوارهای احتمالی D و G هستند که می‌تواند ناشی از ترکیب نیتروژن با ساختارهای ریزی از گرافیت باشد [۳۶].

جدول ۶ پارامترهای ایستایی نمونه‌های با زیرلایه مس.

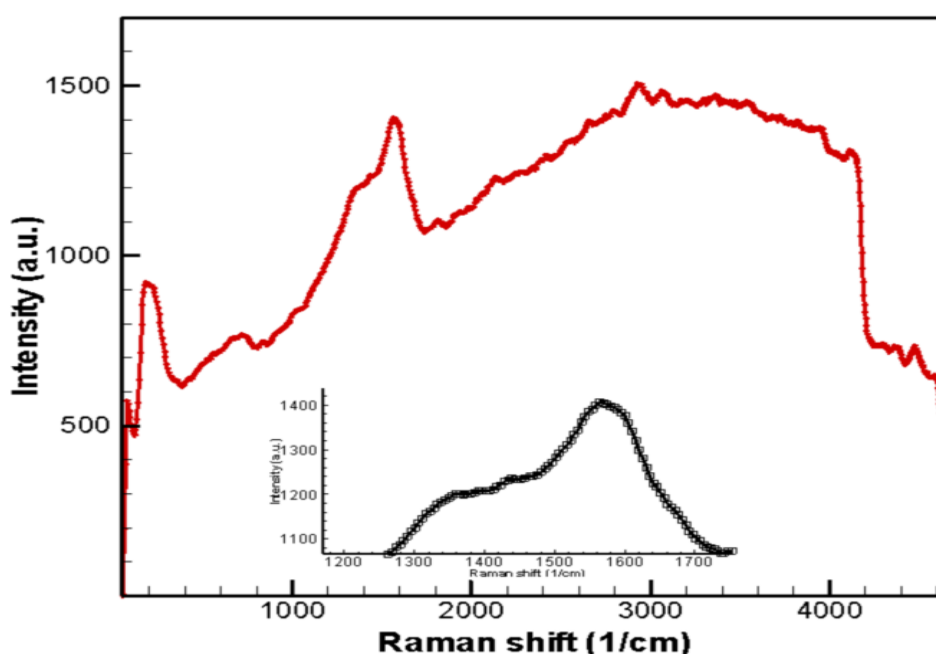
پارامتر	یکا	نمونه Cu-1	نمونه Cu-2	نمونه Cu-3
S_q	[nm]	۴/۸۸۷	۲۳/۸۵	۱۰/۳۱
S_a	[nm]	۳/۸۱۸	۱۸/۴۹	۸/۱۵
S_{sk}	[-]	۰/۷۶۸۷	۰/۶۶۴۰	۰/۴۰۱۷
S_{ku}	[-]	۰/۸۲۷۸	۰/۵۴۸۷	۰/۲۴۰۹

جدول ۷ پارامترهای ایستایی نمونه‌های با زیرلایه استیل.

پارامتر	یکا	نمونه SS-1	نمونه SS-2	نمونه SS-3
S_q	[nm]	۲۲/۲	۲۳/۷۴	۶/۷۱۶
S_a	[nm]	۱۷/۴۵	۱۸/۳۸	۵/۲۲۴
S_{sk}	[-]	۰/۸۵۳۳	۰/۶۰۷۹	-۰/۲۰۶۵
S_{ku}	[-]	۱/۱۵۹	۰/۶۶۸۶	۰/۴۶۴۶



شکل ۸ طیف EDX نمونه تهیه شده در فشار ۱۸.۵ میلی‌تور.



شکل ۹ طیف رامان نمونه تهیه شده در فشار ۱۸/۵ میلی‌تور بر زیرلایه شیشه.

برداشت

در این پژوهش، Ag@a-cH:N بر زیرلایه‌های مختلف فلزی با روش همزمان کندوپاش RF و RF-PECVD تهیه و مشخصه یابی شدند. لایه‌ها در دمای اتاق، در فشارهای کاری مختلف، در پلاسمای گازهای N_2+C_2H_2 و از هدف نقره ساخته شدند. با بررسی پارامترهای ایستایی از داده‌های AFM مشخص شد که نمونه‌های تهیه شده در فشار کاری ۱۸/۵ میلی‌تور، بدلیل ظهور ساختارهای جزیره‌ای از قله‌ها و دره‌ها، سطح خشن‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. با بررسی نظری ریختار لایه‌ها بر پایه ویژگی های برخالی لایه‌ها نیز این ویژگی و تغییرات در سطح لایه‌ها تایید شد. که این افزایش زبری در نمونه‌ها به افزایش اندازه دانه‌بندی و کاهش تنش در نمونه‌ها نسبت داده شد. در نتیجه، رشد عمودی لایه‌ها در این فشار کاری بیشتر بوده است. در ادامه نیز با بررسی طیف‌های EDX و رامان، وجود عناصر تعریفی در لایه‌ها تایید شد و حتی در طیف رامان، قله های بیشتری از نوارهای D و G از ترکیب نیتروژن با ساختارهای گرافیتی دیده شد.

قدردانی

نویسندگان از همکاری گروه پژوهشی فناوری خلا سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف در راستای هدف این کار پژوهشی تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

[1] KN Chopra and AK Maini, *"Thin Film and Their Applications in Military and Civil Sectors"*, Defence Research and Development Organisation. ISBN-13: 978-8186514320 (2010).

[2] Zelati A., *"Multifractal and optical characterization of silver nanoparticles embedded in carbon films prepared in C2H2+ N2 gas mixtures"*, The European Physical Journal Plus, 137(9), 1084, 2022. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03307-0

[3] Croes M., Akhavan B., Sharifahmadian O., Fan H., Mertens R., Tan R.P., Chunara A., Fadzil A.A., Wise S.G., Kruyt M.C., Wijdicks S., Hennink W.E., Bilek M.M.M., Yavari S.A., *"A multifaceted biomimetic interface to improve the longevity of orthopedic implants"*, Acta Biomaterialia, 110, 2020, 266–279. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.04.020

[4] Farnood A., Ranjbar M., Azarian M., Salamati H., *"Hydrogen sensing by plasmon decoupling effect in nanostructured Pd/Au films"*, International Journal of Hydrogen Energy, 47(32), 14759-14765, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.213

[5] Habibi M., Mirzaei S., Arman A., Jurečka S., Sadeghi S., Zelati A., Shakoury A., Tanhaee E., Ghobadi N., Ehteram H., Ţălu Ş., *"Microstructure, fractal geometry and corrosion properties of CrN*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.14.7]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.405]

Superlattices، and Microstructures, 146, 106681, 2020. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106681

[13] Salehi M., Amraee Rad G., Hafezi F., Arman A., Bonjakhi M., *"Deep Reactive Etching of Silica with SF6/H2 Plasma: Variation of process parameters and microstructural studies*", Vakuum in Forschung und Praxis, 33(2), 40-44, 2021. https://doi.org/10.1002/vipr.202100756

[14] Nečas D., Klapetek P., *"Gwyddion: An open-source software for SPM data analysis,"* Cent. Eur. J. Phys., vol. 10, no. 1, pp. 181–188, 2012, doi: 10.2478/s11534-011-0096-2.

[15] Mwema F.M., Jen T-C., Kaspar P., *"Fractal Theory in Thin Films: Literature Review and Bibliometric Evidence on Applications and Trends*", Fractal and Fractional, 6(9), 489, 2022. https://doi.org/10.3390/fractalfract6090489

[16] Sadeghi M., Arman A., Ţălu Ş., Korpi A.G., Shakoury R., Zelati R., Filho H.D.d.F., *"Influence of ion implantation on corrosion resistance of the nickel over steel*", Materials Science and Technology, 2022. https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2131127

[17] Ghaderi A., Shafiekhani A., Solaymani S., Ţălu Ş., Filho H.D.d.F., Ferreira N.S., Matos R.S., Zahrabi H., Dejam L., *"Advanced microstructure, morphology and CO gas sensor properties of Cu/Ni bilayers at nanoscale*", 12(1), 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16347-4

[18] Ţălu Ş., Luna C., Ahmadpourian A., Achour A., Arman A., Naderi S., Ghobadi N., Stach N., Safibonab B., *"Micromorphology and fractal analysis of nickel–carbon composite thin films*", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 27(11), 11425-11431, 2016. https://doi.org/10.1007/s10854-016-5268-9

[19] Ahmadpourian A., Luna C., Boochani A., Arman A., Achour A., Rezaee S., Naderi S., *"The effects of deposition time on surface morphology, structural, electrical and optical properties of sputtered Ag-Cu thin films*", The European Physical Journal Plus, 131(10), 2016. https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16381-2

[20] Ţălu Ş., Astinchap B., Abdolghaderi S., Shafiekhani A., Morozov I.A., *"Multifractal investigation of Ag/DLC nanocomposite thin films*", Scientific Reports, 10(1), 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79455-z

[21] Molamohammadi M., Arman A., Achour A., Astinchap B., Ahmadpourian A., Boochani A., Naderi S., Ahmadpourian A., *"Microstructure and optical properties of cobalt–carbon thin films: The effect of shot number and angular position*", Materials Today Communications, 32, 104072, 2022. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104072

[6] Ghobadi N., Arman A., Sadeghi M., Luna C., Mirzaei S., Zelati A., Shakoury R., *"Optical transitions and photocatalytic activity of NiSe films prepared by the chemical solution deposition method*", The European Physical Journal Plus, 137(6), 661, 2022. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02879-1

[7] Astinchap B., Ghanbaripour H., Amuzgar R., *"Multifractal study of TiO2 thin films deposited by MO-CVD method: The role of precursor amount and substrate temperature*", Optik, 222, 165384, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165384

[8] Fattahi M., Nezafat N.B., ŢăluŞ., Solaymani S., Ghoranneviss S., Elahi S.M., Shafiekhani A., Rezaee S., *"Topographic characterization of zirconia-based ceramics by atomic force microscopy: A case study on different laser irradiations*", Journal of Alloys and Compounds, 831, 154763, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154763

[9] Habibi S., Sadeghi M., Arman A., Sobola A., Luna C., Mirzaei C., Zelati C., Filho H.D.d.F., ŢăluŞ., *"Corrosion resistance and surface microstructure of Mg3N2/SS thin films by plasma focus instrument*", Microscopy research، and technique, 85(8), 2880-2893, 2022. https://doi.org/10.1002/jemt.24138

[10] Czaja P., Boochani A., Przewoźnik J., Yeganeh M., Zelati A., Yari A., Amiri A., Naderi S., Fitta M., Duraczyńska D., Serwicka E.M., Stan-Głowińska E.M., Lityńska-Dobrzyńska L., *"Microstructure, catalytic activity, magnetic and electronic properties of Ni3Al, Ni3Ga and Ni3Sn melt spun intermetallics from experimental and DFT computational standpoints*", Journal of Alloys and Compounds, 927, 167076, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167076

[11] Tabrizi A.T., Aghajani H., Laleh F.F., *"Tribological study of thin-electroplated chromium: evaluation of Wear rate as a function of surface roughness*", Experimental Techniques, 419, 127317, 2021. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127317

[12] Rezaee S., Arman A., Jurečka S, Korpi A.G., Mwema F., Luna C., Sobola D., Kulesza S., Shakoury R., Bramowicz M., Ahmadpourian M., *"Effect of annealing on the micromorphology and corrosion properties of Ti/SS thin films*",

Electronics, 26(6), 4193-4197, 2015. https://doi.org/10.1007/s10854-015-2965-8

[30] Sharifahmadian O., Zhai C., Hung J., Shineh G., Stewart C.A.C, Fadzil A.A., Ionescu M., Gan Y., Wise S.G., Akhavan B., *"Mechanically robust nitrogen-rich plasma polymers: Biofunctional interfaces for surface engineering of biomedical implants*", Materials Today Advances, 12, 2021, 100188. https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100188

[31] Hekmat M., Rostamian F., Shafiekhani A., *"Improving solar cells characteristics by tuning the density distribution of deep trapping states using Au@ DLC decorated on photoanodes*", Materials Science in Semiconductor Processing, 158, (2021), 105782. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105782

[32] Shakoury R., Arman A., Ţălu Ş., Ghosh K., Rezaee S., Luna C., Mwema F., Sherafat K., Salehi M., Mardani M., *"Optical properties, microstructure, and multifractal analyses of ZnS thin films obtained by RF magnetron sputtering*", 31(7), 5262-5273, 2020. https://doi.org/10.1007/s10854-020-03086-3

[33] Astinchap B., Awrang S.M., Norian E., *"Surface characterization of NiO thin films deposited by RF□magnetron sputtering at different thickness: Statistical and multifractal approach*", Microscopy Research and Technique, 85(9), 3056-3068 , 2022. https://doi.org/10.1002/jemt.24165

[34] Ma C., Wang W., Li S., Miao C., Zhang Q., *"Multifractal, structural, and optical properties of Mn-doped ZnO films*", Applied Surface Science, 261 231-236, 2012. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.150

[35] Ţălu Ş., Stach S., Ghodselahi T., Ghaderi A., Solaymani S., Boochani A., Garczyk Ż., *"Topographic characterization of Cu–Ni NPs@ aC: H films by AFM and multifractal analysis*", The Journal of Physical Chemistry B, 119(17), 5662-5670, 2015. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.5b00042

[36] Nilkar M., Ghodsi F.E., Jafari S., Thiry D., Snyders R., *"Effects of nitrogen incorporation on N-doped DLC thin film electrodes fabricated by dielectric barrier discharge plasma: Structural evolution and electrochemical performances*", Journal of Alloys and Compounds, 853, 157298 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157298

nanocomposites prepared by RF-sputtering", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(8), 2015. https://doi.org/10.1007/s10854-015-3170-5

[22] Modabberasl A., Kameli P., Ranjbar M., Salamati H., Ashiri R., *"Fabrication of DLC thin films with improved diamond-like carbon character by the application of external magnetic field, Carbon*", 94, 485-493, 2015. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.06.081

[23] Aghamir F.M., Momen-Baghdadabad A.R., Shafiekhani A., Abdolshah A., *"Comparison of formation of carbon on aluminum and graphite substrates by a low energy plasma focus device*", Surfaces، and Interfaces, 26, 101414, 2021. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101414

[24] Ghodselahi T., Vesaghi M.A., Gelali A., Zahrabi H., Solaymani S., *"Morphology, optical and electrical properties of Cu–Ni nanoparticles in aC: H prepared by co-deposition of RF-sputtering and RF-PECVD*", Applied surface science, 258(2), 727-731, 2011. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.145

[25] Zeng Q., Ning Z., *"High-temperature tribological properties of diamond-like carbon films: A review, Reviews on Advanced Materials Science*", 60,(2021)276–292. https://doi.org/10.1515/rams-2021-0028

[26] Zhang M., Xie T., Qian X., Zhu Y., Liu X., *"Mechanical Properties and Biocompatibility of Ti-doped Diamond-like Carbon Films, ACS Omega*", 5, 36, (2020),22772–22777. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01715

[27] Zarei Ar., Shafiekhani A., *"Surface-enhanced Raman scattering (SERS) of Methyl Orange on Ag-DLC nanoparticles*", Materials Chemistry and Physics, 242, (2020), 122559. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122559

[28] Rajak D. K., Kumar A., Behera A., Menezes P.L., *"Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification*", Properties, and Applications, *Appl. Sci.11*(10), (**2021)**,4445; https://doi.org/10.3390/app11104445

[29] Ghodselahi T., Arman A., *"Magnetoresistance of Cu–Ni nanoparticles in hydrogenated amorphous carbon thin films*", Journal of Materials Science: Materials in